

РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ СВЧ ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Бойко Д.В., Мительман Ю.Е.

ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
Екатеринбург, Россия
ua369602@gmail.com, y.e.mitelman@urfu.ru

Аннотация. Статья посвящена использованию СВЧ фотонных кристаллов и их свойств, применимых для измерения относительной диэлектрической проницаемости. Целью данной работы является описание стадий проектирования и характеристик измерительной установки на основе фотонных кристаллов для исследования диэлектрических свойств образцов.

Работа включает в себя анализ влияния дефекта кристалла на частотную зависимость коэффициента передачи устройства, описание процесса подбора подходящей для измерений структуры кристалла и результаты ее анализа.

В работе описана спроектированная измерительная установка на основе прямоугольного волновода сечением 23×10 мм². Данная разработка является достаточно новой, так как применение СВЧ фотонных кристаллов для измерений ранее массово не практиковалось. Измерительная установка будет использоваться в лаборатории с целью изучения электрофизических свойств различных образцов, в том числе, полученных путем 3D печати.

Ключевые слова: фотонный кристалл, измерительная установка, диэлектрическая проницаемость, прямоугольный волновод, запрещенная зона, разрешенная зона, дефект.

DEVELOPMENT OF A MICROWAVE MEASURING SYSTEM BASED ON PHOTONIC CRYSTALS

Boyko D.V., Mitelman Yu.E.

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The article examines microwave photonic crystals and their properties, applicable for measuring the permittivity. The purpose of this work is to

describe the design stages and characteristics of a measuring device for studying the dielectric properties of samples.

The work includes an analysis of the effect of a defect on the frequency response of the transmission coefficient of a device, a description of the process of selecting a structure suitable for measurements and the results of an analysis of its properties.

As a result of the work, a designed measuring setup based on a rectangular waveguide with a cross section of $23 \times 10 \text{ mm}^2$ is described. This development is quite new since the use of microwave photonic crystals for measurements has not been widely practiced before. The measuring device will be used in the laboratory to study the dielectric properties of various samples, including those obtained by 3D printing.

Key words photonic crystal, measuring device, permittivity, rectangular waveguide, forbidden zone, allowed zone, defect.

Фотонные кристаллы и их свойства

Фотонные кристаллы представляют собой структуры с периодически изменяющейся диэлектрической проницаемостью или неоднородностью, обладающей периодом, сравнимым с длиной волны, распространяющейся в кристалле.

В работе [1] приведены разнообразные одномерные структуры фотонных кристаллов, их графики частотных зависимостей коэффициентов передачи этих устройств и исследовано влияние на них дефекта в периодических структурах фотонных кристаллов на основе волноводов. Также в данной работе приведены основные закономерности влияния количества слоев фотонного кристалла на его характеристики.

В статье [2] описываются принципы расчета и моделирования фотонных кристаллов различных размерностей, в том числе и одномерных, на основе прямоугольных волноводов. В ней приведены иллюстрации и характеристики на некоторые из которых ссылаются авторы работы [1].

В статье [3] приведены характеристики структуры одномерного фотонного кристалла на основе волновода, применяемого для измерений проводимости и толщины образцов.

В данной работе описано изучение и моделирование фотонных кристаллов, работающих в частотном диапазоне от 9 до 12 ГГц на основе прямоугольного волновода с поперечным сечением $23 \times 10 \text{ мм}^2$. Они представляют собой периодические структуры с определенным количеством слоев различной толщины и диэлектрической проницаемости, расположенных поперек волновода и чередующихся вдоль него.

Метод измерения электрофизических параметров материалов

Разработанный метод предоставляет возможность измерять относительную диэлектрическую проницаемость образцов при помощи СВЧ фотонных кристаллов. Измеритель состоит из прямоугольного волновода с фотонным кристаллом в нем. Измеряемый образец представляет собой дефект в одном из слоев кристаллической структуры.

За счет нарушения периодичности, в запрещенной зоне амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) возникает всплеск, по расположению которого можно судить о величине вносимого дефекта и, как следствие, об относительной диэлектрической проницаемости образца.

Данный метод сравним с методом измерения с помощью линий передачи, и обладает всеми его недостатками, но при этом он исключает погрешность, возникающую при сложных расчетах, так как они просто не требуются.

Описание оптимальной структуры фотонного кристалла для измерения диэлектрической проницаемости

Для измерения параметров образца в волноводе необходимо найти структуру, оптимально подходящую по следующим свойствам: достаточно широкая запрещенная зона кристалла в АЧХ, необходимая для максимально достижимой точности измерений, высокий уровень пиков, возникающих при внесении дефектов, и расположение запрещенной зоны в заданном частотном диапазоне.

В результате моделирования была подобрана трехслойная структура, состоящая из 10 элементов. Она обладает следующими параметрами: относительная диэлектрическая проницаемость слоев $\epsilon_{r1} = 2,625$, $\epsilon_{r2} = 1$, $\epsilon_{r3} = 3,025$; толщины слоев $w = 9,1$ мм, $u = 5$ мм, $v = 9,1$ мм. График зависимости коэффициента передачи от частоты (АЧХ) и модель устройства приведены на рисунке 1. Дефект (образец с диэлектрической проницаемостью ϵ_{r2}) внесен в пятый элемент структуры вместо слоя с диэлектрической проницаемостью 1.

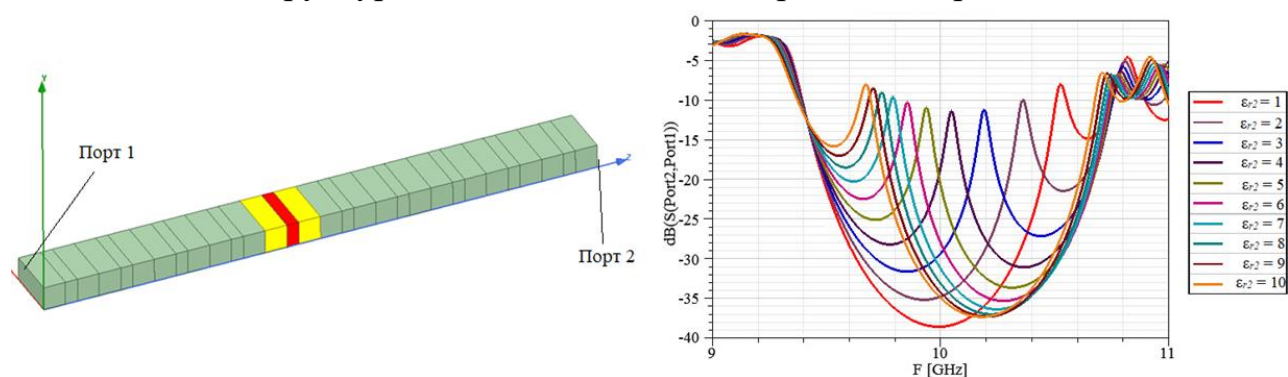


Рисунок 1 – Модель и АЧХ фотонного кристалла на основе волновода

Описание конструкции измерительной установки

Измерительная установка, изображенная на рисунке 2, будет состоять из двух отрезков стандартного прямоугольного волновода с поперечным сечением $23 \times 10 \text{ мм}^2$. С одного конца они соединяются с помощью фланцев 1, а с другого к ним присоединены коаксиально-волноводные переходы 4, с помощью которых устройство подключено к векторному (или скалярному) анализатору цепей с двумя входами (например, *R&S ZVA24*), с помощью которого проводится измерение АЧХ устройства, по которым в дальнейшем будет определяться диэлектрическая проницаемость образца.

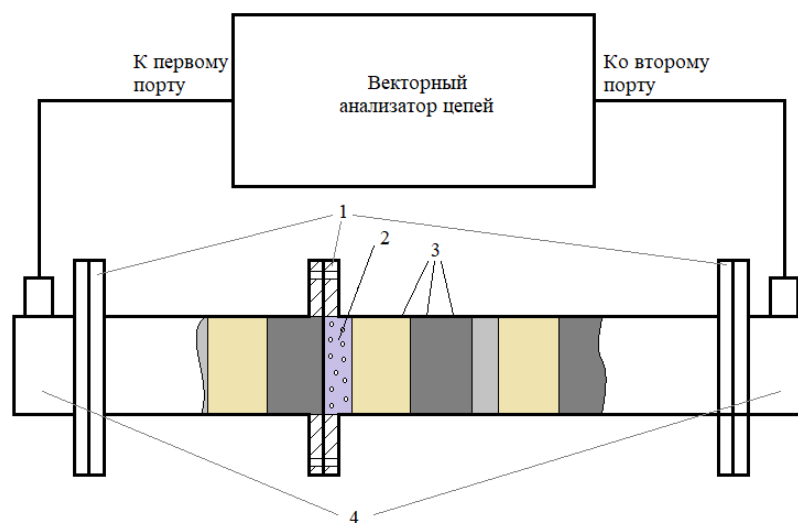


Рисунок 2 – Схема измерительной установки

Оценка точности измерения

На основе найденной структуры фотонного кристалла были произведены расчеты для изучения точности измерений на установке. Изначально, было необходимо приблизиться к точности в 0,01 при измерении относительной диэлектрической проницаемости.

В случае отклонения размеров образца от размеров предназначенной для него ячейки фотонного кристалла, необходимо учитывать возникающие при этом отклонения положения пика в запрещенной зоне АЧХ.

Было проведено исследование этого эффекта с помощью модели, построенной в системе трехмерного электродинамического моделирования *Ansys HFSS*. Изучалась итоговая трехслойная десятиэлементная структура. Наиболее пристально изучалось влияние зазоров при внесении дефекта с диэлектрической проницаемостью 10, так как при более низких значениях относительной диэлектрической проницаемости влияние зазоров оказывается значительно меньше.

При одновременном возникновении перпендикулярного стенкам волновода и прилегающих к ним зазоров возникает наибольшее снижение

точности. При этом зависимость ошибки при измерении от толщины зазоров, изображенная на рисунке 3, наиболее равномерная и однородная.

Можно сделать вывод, что, зная зависимость величины частотного отклонения от толщины воздушных зазоров в трех плоскостях, можно легко провести коррекцию и детектировать изменение относительной диэлектрической проницаемости с точностью вплоть до 0,01.

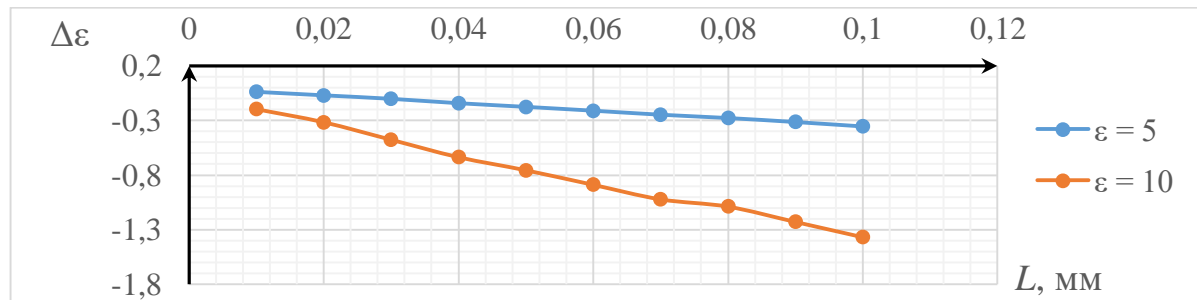


Рисунок 3 – График зависимости ошибки при измерении от толщины общей воздушной прослойки

Заключение

В процессе изучения различных структур фотонного кристалла была подобрана оптимальная трехэлементная десятислойная структура, модель которой можно использовать для точных измерений диэлектрической проницаемости. Размеры образца, подходящего для разработанной измерительной установки, составляют $23 \times 10 \times 5$ мм³. Такой размер позволяет легко создавать образцы для измерения при помощи современных технологий трехмерной печати. Возможно также с небольшой коррекцией уменьшить требуемый размер образца.

В результате анализа параметров предполагаемого устройства был сделан вывод о том, что при помощи найденной структуры можно добиться достаточно высокой точности измерений, которая позволяет измерять относительную диэлектрическую проницаемость с точностью от 0,001 до 0,01 при идеальных размерах образцов.

Измерительная установка, описываемая в данной работе, может применяться в лабораториях для изучения диэлектрических свойств различных образцов, например созданных с помощью трехмерной печати, а также для точного определения параметров подложек, используемых для производства микрополосковых устройств. Таким образом результаты могут быть использованы в деятельности таких предприятий Свердловской области как ООО «Интеграция»[4], ЗАО «Техносвязь»[5], НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова [6].

Библиографический список

1. Усанов Д.А. СВЧ фотонные кристаллы – новая разновидность периодических структур в радиоэлектронике / Д.А. Усанов, С.А. Никитов, А.В. Скрипаль, Д.В. Пономарев. – Саратов : Издательство Саратовского университета, 2016. – 84 с.
2. Gomez A. On One- and Two-Dimensional Electromagnetic Band Gap Structures in Rectangular Waveguides at Microwave Frequencies / Gomez A., Vegas A., Solano M.A. // Electromagnetics. – 2005. – №25. – С. 437–460.
3. Никитов С.А. Определение проводимости и толщины полупроводниковых пластин и нанометровых слоев с использованием одномерных СВЧ фотонных кристаллов / С.А. Никитов, Ю.В. Гуляев, Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Д.В. Пономарев // Доклады Академии Наук. – 2013. – Т. 448, № 1. – С. 35–38.
4. Интеграция [Электронный ресурс]: Промышленная группа. – Режим доступа: <https://zakazplat.ru/> (дата обращения 28.10.2020).
5. Техносвязь [Электронный ресурс] : Предприятие изготовитель печатных плат. – Режим доступа: <http://www.techno-svyaz.ru/production/> (дата обращения 28.10.2020).
6. НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова [Электронный ресурс] : Производство печатных плат. – Режим доступа: <https://www.npoa.ru/catalog/services/izgotovlenie-odno--dvustoronnih-pechatnyh-plat-mpp-do-12-sloev-na-otechestvennyh-i-importnyh-materialah.html> (дата обращения 28.10.2020).